

# 수직벽 가공을 위한 레이저 밀링 경로생성 알고리즘 Tool-path Generation Algorithm for Vertical Wall Machining Using Laser Milling

\*김형중<sup>1</sup>, 위경훈<sup>1</sup>, #안성훈<sup>2</sup>, 전차수<sup>3</sup>, 김학일<sup>4</sup>

H. J. Kim<sup>1</sup>, K. H. Wie<sup>1</sup>, #S. H. Ahn<sup>2</sup> (ahnsh@snu.ac.kr), C. S. Kim<sup>3</sup>, H. I. Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부 대학원, <sup>2</sup> 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소,

<sup>3</sup> 경상대학교 산업시스템공학부, <sup>4</sup> (주)쿠키혼

Key words : Laser beam machining, Vertical wall, Tool-interference, Tool-path generation

## 1. 서론

최근 정보통신, 가전, 자동차, 생명 산업의 급격한 발달과 제품의 경량화, 소형화를 위한 미세부품의 수요가 증가함에 따라 미세가공 기술(micro fabrication technology)에 대한 중요성이 부각되고 있다. 레이저 가공기술은 에너지를 집중시켜 고체의 표면으로부터 질량을 제거하는 일종의 열공정(thermal process) 방식의 미세가공 기술로서, 집광 면적이 매우 좁기 때문에, 수십  $\mu\text{m}$ 의 국부 가공이 가능하고 소재에 가해지는 응력이나 뒤틀림이 거의 없다. 따라서 매우 얇은 벽, 미세한 채널 등을 가공하는 데에 적합하다. 또한 비접촉 가공 방식이고 에너지 밀도가 높은 레이저 빔을 사용하기 때문에, 가공이 어려운 합금(SUS, Ti 등)이나 세라믹을 포함하여 재료의 경도나 강성에 상관없이 다양한 재료의 가공이 가능하다.<sup>1</sup> 이러한 특징으로 레이저 가공 기술의 상용화를 위한 많은 연구들이 진행되었으며, 최근에는 고정밀도와 마이크로/나노 스케일 수준에서 2.5 차원 혹은 3 차원의 형상의 가공이 가능하게 되었다.<sup>2</sup>

하지만 기계식 절삭가공을 대상으로 개발된 Computer-Aided Manufacturing(CAM)시스템들은, 이러한 레이저 가공 기술의 우수함에 비해, 레이저 가공의 방법론적 특성이 고려된 정밀한 가공 결과를 제공하지 못한다. 정밀한 레이저 가공을 위해서는 형상에 대한 정확한 가공경로뿐만 아니라, 레이저 빔과 재료의 특성이 함께 고려되어야 한다. 특히 원뿔형태로 주사되는 레이저 빔의 특성으로 인해 항상 테이퍼(taper)가 발생하며, 이는 레이저 빔의 주사 위치(beam origin)나 가공 조건을 변경하여 원하는 수준으로 줄여질 수 있다.<sup>3</sup>

본 논문에서는 5 축 레이저 밀링 장비를 이용하여 정밀한 수직벽을 가공하기 위한 경로생성 알고리즘에 대해서 기술하였다. 스캐닝 방식 기반의 레이저 밀링 장비에서 발생하는 테이퍼 문제에 대해서 정리하고, 이를 최소화하기 위한 경로생성 알고리즘을 제안하였다. 그리고 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해, 가공 테스트를 수행하고 그 결과를 정리하였다.

## 2. 수직벽 가공 알고리즘

레이저 가공시 발생하는 테이퍼 문제는 레이저 빔의 형태로 인해 발생하는 고유한 현상으로 최종 부품의 품질에 있어 결함으로 여겨진다. 특히, 첨가공 기반의 레이저 밀링에서는 수직벽 가공시, 일반적인 기계식 절삭가공용 경로를 사용할 경우 Fig. 1과 같은 가공오차가 발생하게 된다.

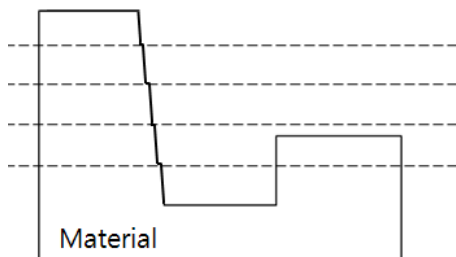


Fig. 1 Taper shapes in laser milling

이러한 테이퍼 현상은 레이저 빔과 피삭재 간의 간섭으로 인한 결함으로 정의될 수 있으며, 이는 5 축 절삭가공의 공구간섭 문제와 유사하다.<sup>4</sup> 공구간섭 문제는 크게 가공이 발생하는 영역에서의 절삭공구와 피삭재의 국부간섭(local interference)과 이외 영역에서 발생하는 전역간섭(global interference)으로 나뉘어진다. 본 논문은 수직벽 가공의 품질을 보장하기 위한 알고리즘을 개발하는 것으로, 레이저 빔과 피삭재 사이의 국부간섭 문제에 대해서만 다룬다.

레이저 밀링을 위한 공정계획은 경로생성과 간섭탐지 및 경로개선으로 이루어진다. 경로생성은 Stereolithography (STL) 모델을 입력 데이터로 사용하며, 간섭탐지는 STL 모델의 삼각형과 원뿔간의 간섭문제로 정리하였다. 간섭이 발생할 경우, 레이저 빔의 원점을 이동시켜 경로를 개선하였다.

### 2.1 간섭탐지 알고리즘

원뿔과 단일 삼각형 사이의 간섭탐지는 간섭 유형별로 총 3 가지 경우로 나뉘어진다.

- I. 원뿔과 삼각형 꼭지점의 교차: 삼각형의 한 꼭지점이 원뿔의 내부에 존재한다면, 해당 꼭지점을 포함하는 삼각형은 반드시 원뿔과 교차한다(Fig. 2a).
- II. 원뿔과 삼각형 모서리의 교차: 삼각형의 세 꼭지점이 모두 원뿔 외부에 존재한다면, 삼각형의 세 모서리와 원뿔의 교차 여부를 확인한다(Fig. 2b).
- III. 원뿔과 삼각형 면의 교차: 유형 I, II를 제외한, 원뿔과 삼각형 사이의 간섭은 원뿔이 삼각형 내부에 포함되는 것이다(Fig. 2c).

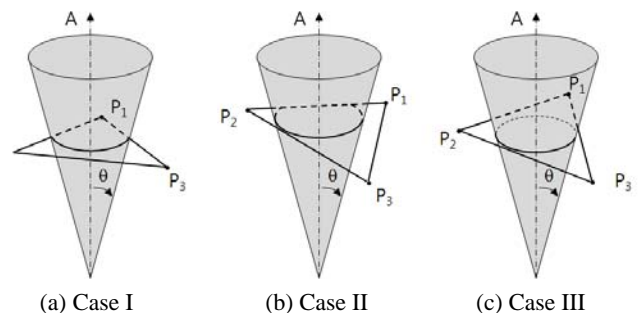


Fig. 2 Three intersection cases between cone and triangle

각 유형별로 수학적 계산을 통해 STL 모델의 단일 삼각형과 원뿔로 형상화한 레이저 간의 간섭 현상 발생을 탐지할 수 있다. 또 위의 단일 삼각형과 원뿔간의 간섭 탐지 알고리즘을 이용하여 STL 모델의 모든 삼각형에 대해 레이저와의 간섭 유무를 판단한다.

### 2.2 간섭회피 알고리즘

간섭이 탐지된 경우, 레이저 빔의 주사위치를 가공가능 위치(feasible position)로 변경함으로써 테이퍼의 발생을 방지할 수 있다. 간섭 회피를 위한 자세한 알고리즘은 다음과 같다.

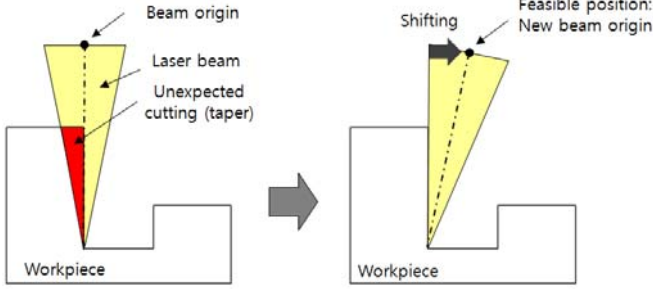


Fig. 3 Avoiding of taper by shifting the beam origin

1. 주어진 삼각형과 원뿔의 간섭을 탐지한다.
2. 간섭이 발생했을 경우, 가공가능위치를 계산한다.
3. 가공가능영역으로 주사위치를 이동시킨다.

가공가능위치는 간섭이 탐지된 삼각형의 수직벡터 방향으로 주사위치를 이동시켜서 구하였다. Fig. 3 은 가공가능 위치로 주사위치를 변경시켜서, 테이퍼가 회피되는 것을 보여준다.

### 3. 구현 및 결과

제안된 알고리즘을 평가하기 위해 C# 기반의 경로생성 프로그램을 구현하였다. 입력 STL 모델의 각 삼각형과 초기 지정된 레이저 주사위치를 이용하여 간섭 현상의 유무를 판단하는 모듈과 간섭발생 시 주사위치를 이동시키는 간섭회피 모듈을 구현하여 최종 경로 생성에 반영될 수 있도록 하였다.

생성된 가공경로를 Fig. 1 과 같이 수직벽을 가지며 가공 시에 테이퍼 문제의 발생이 예상되는 모델에 적용하였으며 비교를 위해 제안된 알고리즘을 사용하지 않은 수직벽 모델 또한 가공하였다.

Fig. 4 는 제안된 알고리즘을 사용하지 않은 모델로서 아크릴 재료에 10 $\mu$ m 의 가공 깊이(Depth of Cut)를 적용한 층가공을 통해 깊이 약 2mm 의 홈을 가공한 결과이다. 모델의 벽면에 테이퍼 현상이 나타나는 것을 관찰할 수 있으며, 경사면의 각도는 약 35 $^\circ$ 로 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 레이저의 평균 각도(약 7 $^\circ$ )보다 더욱 큰 테이퍼 각이 생긴 이유는 열에 약한 피삭재료의 특성 때문에 레이저에 의해 기화된 고온의 아크릴 기체가 상승하면서 벽면의 아크릴을 제거했기 때문이다.

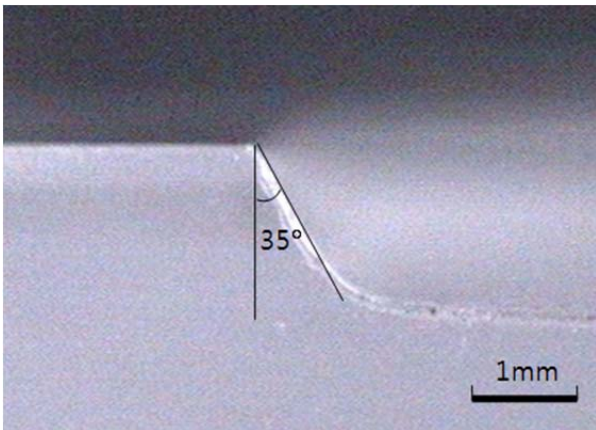


Fig. 4 Result of laser milling without taper avoided tool-path

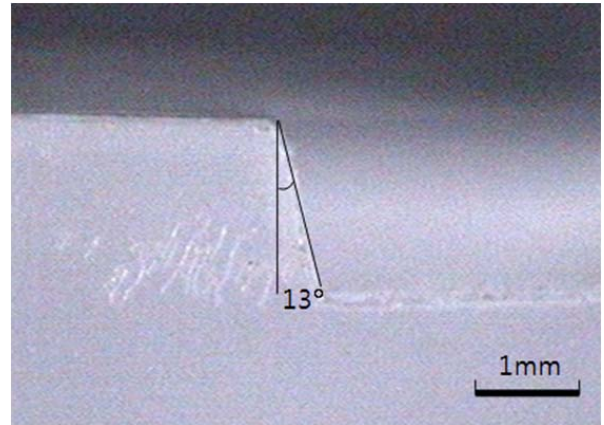


Fig. 5 Result of laser milling with taper avoided tool-path

제안된 알고리즘의 검증을 위해 아크릴 재료에 Fig. 4 와 같은 수직벽 모델을 간섭회피 알고리즘을 적용하여 가공하였다(Fig. 5). 벽면의 각도는 약 13 $^\circ$  였으며 기존 알고리즘 대비 22 $^\circ$ 의 테이퍼 각이 개선되어 약 63%의 정확도 향상을 확인할 수 있었다.

### 4. 결론

본 논문에서는 수직벽 가공의 품질을 향상시키기 위한 공정계획 모듈을 구현하고, 이를 평가하였다. 5 축 레이저 밀링 장비를 운용하기 위한 공정계획을 수립하고, 경로생성에서는 테두리의 가공품질을 고려하여 킨투어와 스캐닝 경로를 함께 사용하였다. 그리고 테이퍼 현상을 최소화하기 위해, 레이저 빔과 피삭재 간의 국부간섭을 판단할 수 있는 알고리즘을 구성하였다. 간섭이 발생할 경우, 간섭이 최소화되도록 레이저 빔의 주사위치를 변경함으로써 수직벽 가공의 품질을 향상시켰다.

제안된 알고리즘의 평가를 위해, 레이저를 이용하여 아크릴 재료에 깊이 약 2 mm 의 미세 표면 모델을 가공하였으며, 비교적 우수한 품질의 수직벽 가공 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

### 후기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(과제번호: TR080578), 서울대학교 2 단계 BK21 사업, ERC(Micro Thermal System Research Center)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Dubey, A. K. and Yadava, V., "Laser beam machining - A review," International Journal of Machine Tools and Manufacture, **48**, 609-628, 2008.
2. Liu, J. S., Li, L. J. and Jin, X. Z., "Accuracy control of three-dimensional Nd:YAG laser shaping by ablation," Optics & Laser Technology, **31**, 419-423, 1999.
3. Bandyopadhyay, S., Sarin Sundar, J. K., Sundararajan, G. and Joshi, S. V., "Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd:YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets," Journal of Materials Processing Technology, **127**, 83-95, 2002.
4. Ding, S., Mannan, M. A. and Poo, A. N., "Oriented bounding box and octree based global interference detection in 5-axis machining of free-form surfaces," Computer-Aided Design, **36**, 1281-1294, 2004.